

Gekoppelter Atmosphäre-Boden-Einfluss auf die Schallausbreitung einer höher gelegenen Schallquelle

Astrid Ziemann und Kati Balogh

Zusammenfassung:

Im Genehmigungsverfahren für den Bau hochliegender Schallquellen (z.B. Windenergieanlagen) muss der Nachweis geführt werden, dass von den Anlagen keine schädlichen Umwelteinwirkungen ausgehen. Es ist es daher notwendig, die Schallausbreitung derartiger Quellen grundsätzlich zu untersuchen.

Eine Schwierigkeit stellt dabei die gekoppelte Wirkung von Temperatur-, Windgeschwindigkeits- und Windrichtungsprofil in Zusammenhang mit dem Bodeneinfluss auf die Schallausbreitung dar. Dieser zeitlich und räumlich variable Atmosphäreneinfluss wird insbesondere bei Langzeituntersuchungen der Schallimmission bisher nur unzureichend in den operationellen Modellen beschrieben. Das Ziel der Studie besteht deshalb darin, die gekoppelte Wirkung von Atmosphäre- und Boden-Einfluss auf die Schallausbreitung in einem Bereich bis zu 2 km Entfernung von der Schallquelle mit dem Modell SMART (Sound propagation model of the atmosphere using ray-tracing) zu untersuchen.

Summary:

The licensing procedure for the construction of high-placed sound sources (e.g. wind power stations) demands to proof that no (significant and) harmful impact on environment is outgoing from these systems. Therefore, it is necessary to analyse the sound propagation of such a kind of sources.

In this context one central problem has to be managed: the coupled effect of temperature, wind speed and wind direction profiles combined with the influence of surface on sound propagation. The temporally and spatially variable influence of the atmosphere is only insufficiently described by the operational models, especially in relation to long-time investigations of sound immission. Consequently, the aim of this study was to investigate the coupled effect of atmospheric and surface influence on sound propagation up to distances of 2 km away from the sound source using the model SMART (Sound propagation model of the atmosphere using ray-tracing).

1 Einleitung

Die Schallausbreitungsrechnungen für Umweltverträglichkeitsprüfungen müssen nach der TA Lärm durchgeführt werden, die bezüglich der Schallausbreitung auf die DIN ISO 9613 verweist. Diese Richtlinie wurde für die bodennahe Schallausbreitung bei mittleren Höhen von Quelle und Empfänger < 30 m entwickelt und erprobt. Detaillierte Untersuchungen zum Vertrauensbereich der DIN ISO 9613 bei der Anwendung für höher liegende Schallquellen, z.B. Windenergieanlagen, liegen bisher nicht vor.

Für eine Schallausbreitung im Freien über Entfernungen von einigen hundert Metern und mehr gewinnt der Zustand des Ausbreitungsmediums an zunehmender Bedeutung. Der Effekt der Luftabsorption ist dabei ausreichend in der Richtlinie DIN ISO 9613-1 berücksichtigt. Demgegenüber wird der Effekt der Schallrefraktion momentan nur pauschal behandelt (siehe DIN ISO 9613-2). Gerade dieser Effekt wird jedoch als besonders wichtig betrachtet (siehe z.B. Piercy et al., 1977; Heimann und Salomons, 2004), da er im Gegensatz zur Luftabsorption auch zu einer verstärkten Schallimmission und damit Lärmbelastung gegenüber einer ungestörten Schallausbreitung führen kann.

Eine Schwierigkeit bei der Betrachtung der Refraktion stellt die gekoppelte Wirkung von Temperatur-, Windgeschwindigkeits- und Windrichtungsprofil auf den Schallstrahlenverlauf dar. Hinzu kommt die zeitliche und räumliche Variabilität der Atmosphäreneigenschaften auf verschiedenen Raum-Zeit-Skalen (siehe z.B. Orlanski, 1975). Besonders bei Langzeituntersuchungen der Schallimmission wird dieser Effekt bisher nur unzureichend in den vorhandenen Richtlinien beschrieben. Für die Charakterisierung des Atmosphäreneinflusses reicht es dabei nicht, mit Klima-Werten für Temperatur- und Windfeld eine einzelne Schallausbreitungsrechnung durchzuführen (siehe z.B. Kühner, 1993; Raabe et al., 1998). Vielmehr müssen zunächst Ausbreitungsrechnungen für viele verschiedene Atmosphärenzustände vorgenommen und die Ergebnisse anschließend einer Mittelung unterzogen werden, um eine Aussage zum Schallklima eines Ortes zu erhalten. Ziel dieser Studie war es deshalb, den gekoppelten Atmosphäre-Boden-Einfluss auf die Schallausbreitung einer hoch gelegenen Schallquelle über einen längeren Zeitraum für einen Ort zu untersuchen.

2 Untersuchungsmethode

2.1 Schallausbreitungsmodell

In der vorliegenden Studie wird das zweidimensionale (vertikal und eine horizontale Richtung) Schallstrahlenmodell SMART angewendet. Ausgehend von einer Schallquelle, von der eine Anzahl an Schallstrahlen ausgesandt wird, kann unter Verwendung eines Refraktionsgesetzes für bewegte Medien (Ostashev et al., 2001) die zurückgelegte Schallstrecke verfolgt werden.

Die Änderung der Schallintensität im Immissionsniveau, d.h. der Dämpfungspegel, ist bei konstanter Schallabstrahlung und vorausgesetzter Schallenergieerhaltung nur vom Verhältnis der Querschnittsflächen einer Schallröhre, die aus zwei Schallstrahlen gebildet wird, in einem Referenzabstand (hier: 1 m) und in einem aktuellen Abstand von der Schallquelle abhängig (Brekhovskikh und Godin, 1992). Die geometrischen Parameter der Schallstrahlenverläufe werden somit zur Bestimmung von Dämpfungspegeln verwendet (siehe Ziemann, 2003).

Die Dämpfungspegel werden in Abhängigkeit vom Abstand zur Schallquelle ermittelt und auf vorgegebene horizontale Abstandsintervalle aufgeteilt. Falls in einem solchen Intervall mehrere Dämpfungswerte gesammelt werden, wird eine logarithmische Mittelung durchgeführt. Als Endergebnis erhält man einen Dämpfungspegelwert pro Abstandsintervall. Werden die Dämpfungsberechnungen für verschiedene Azimutwinkel durchgeführt, resultiert eine horizontale Dämpfungspegelkarte für ein Immissionshöhenniveau.

Neben den meteorologischen Bedingungen haben auch die Bodeneigenschaften einen bedeutenden Einfluss auf die Schallausbreitung im Freien. Ein wichtiger Effekt ist dabei die Reflexion von Schallstrahlen am Boden (siehe z.B. Salomons, 2001). Dieser Einfluss wird im Modell SMART mit dem frequenzabhängigen Reflexionsgrad beschrieben. Dieser entspricht dem quadrierten Reflexionskoeffizienten und beschreibt eine Verringerung der Schallenergie nach Reflexion an einem schallweichen Boden (Reflexionsgrad <1). Um den Reflexionsgrad bestimmen zu können, müssen die Impedanzen (Wellenwiderstände) des Bodens und der Luft sowie der Einfallswinkel des Schallstrahls auf den Boden bekannt sein. Die Impedanz von Luft kann aus der Luftdichte und der temperaturabhängigen Schallgeschwindigkeit abgeleitet werden. Zur Bestimmung der frequenzabhängigen Bodenimpedanz wird das vielfach angewendete Modell von Delany und Bazley (1970) mit dem Parameter „Flusswiderstand“ zur Beschreibung der akustischen Oberflächeneigenschaften genutzt. In der vorliegenden Studie wurde der Flusswiderstand mit einem Wert von 150 kPa s/m² für Ackerboden abgeschätzt (Bolen und Bass, 1981). Die Schallabschwächung durch den Bodeneinfluss steigt mit abnehmendem Flusswiderstand und wachsender Schallfrequenz (z.B. Balogh und Ziemann, 2005).

Mit steigender Schallfrequenz nimmt auch die Luftabsorption zu. Zusätzlich hängt die Luftabsorption von der Luftfeuchte, der Lufttemperatur und dem aktuellen Luftdruck ab. Der Absorptionskoeffizient wird in der hier verwendeten Version des Modells SMART mit der Berechnungsvorschrift VDI 2714 bestimmt (siehe z.B. Balogh und Ziemann, 2005).

Die Effekte der Schallstrahlenreflexion am Boden und der Luftabsorption führen zu einer Änderung des Dämpfungspegels, der aus Kugelwellendivergenz und Schallstrahlenrefraktion resultiert.

2.2 Datengrundlage

Eingangsdaten für das Modell SMART sind Vertikalprofile der Lufttemperatur und des Windvektors. Diese Daten wurden im Rahmen der Studie vom Deutschen Wetterdienst am Meteorologischen Observatorium Lindenberg (MOL) für das Jahr 2003 (täglich 0 und 12 UTC) bereitgestellt. Das Observatorium gilt als Referenzstation für mikro- und mesometeorologische Untersuchungen im küstenfernen Tiefland.

Die verwendeten meteorologischen Daten wurden auf dem sogenannten Grenzschichtmessfeld bei Falkenberg (Koordinaten: geogr. Breite : 52° 10' 01" N, geogr. Länge : 14° 07' 27" E, Höhe über NN: 73,5 m) mit einem Profilmast (bis 11 m Höhe), einem großen Mast (bis 99 m Höhe) und mit den Fernmessverfahren SODAR/RASS (bis max. ca. 300 m Höhe) mit unterschiedlicher vertikaler Auflösung gemessen. Die Qualität der Daten wird mit Qualitätskennzeichen angegeben. Diese Angaben wurden bei der Erstellung der Eingabedaten für das Modell SMART insbesondere im Überschneidungsbereich zwischen großem Mast und SODAR/RASS beachtet.

Die Verfügbarkeit von Daten mit einem guten bis sehr guten Qualitätskennzeichen schwankte tageszeitlich und zwischen den einzelnen Monaten. Besonders nachts kam es zu Datenausfällen in größeren Messhöhen (Fernmessverfahren SODAR/RASS). Diese Messzeiten konnten für die Schallausbreitungssimulation nicht weiter berücksichtigt werden. Eine genauere Analyse der Datenverfügbarkeit ist Ziemann und Balogh (2005a) zu entnehmen.

Für die Modellsimulationen standen 250 Profile für den 0-Uhr-Termin und 307 Profile für den 12-Uhr-Termin bereit.

3 Schallimmissionsrechnungen

Das Modell SMART wurde für die Untersuchung der Schallausbreitung hochliegender Quellen mit frequenzabhängigen Berechnungsmodulen für den Bodeneinfluss und die Luftabsorption versehen (siehe Kapitel 2.1). Die Schalldämpfung wurde für Terzbänder mit den Mittenfrequenzen von 63 Hz bis 3150 Hz bestimmt.

Es wurde eine Monopol-Schallquelle in einer Höhe von 140 Meter über Grund für die Simulation zukünftiger Windenergieanlagen verwendet. Die Immissionshöhe über Grund wurde mit 5 m vorgegeben.

Die Dämpfungsberechnung, abhängig von der Entfernungszunahme von der Schallquelle, der Refraktion der Schallstrahlen, der Schallreflexion am Boden und der Luftabsorption, wird für ein Untersuchungsgebiet mit einer horizontalen Ausdehnung von 2000 Meter um die Schallquelle bestimmt. Für größere Entfernungen ist die Dämpfung bereits so groß, dass die Richtlinien zum Lärmschutz auch unter günstigen Ausbreitungsbedingungen eingehalten werden.

Neben der Berechnung der Dämpfungspegel sollte auch die sogenannte Zusatzdämpfung durch den Atmosphären- und Bodeneinfluss bestimmt werden. Dazu wurde eine Schallausbreitungssimulation mit einer unbewegten und ungeschichteten Atmosphäre durchgeführt. Die Zusatzdämpfung ergibt sich dann aus der Differenz zwischen dem Dämpfungspegel mit Atmosphärenschichtung und dem Dämpfungspegel ohne Schallstrahlenrefraktion in einer Atmosphäre ohne vertikale Gradienten der meteorologischen Größen.

4 Ergebnisdiskussion

Im Folgenden werden erste Ergebnisse der Untersuchungen vorgestellt.

Anhand von horizontalen Dämpfungspegelkarten, die ohne Vertikalgradienten von Temperatur und Windvektor hergestellt wurden, kann zunächst das Zusammenwirken von geometrisch bedingter Schallintensitätspegelabnahme mit zunehmender Entfernung (Kugelwellendivergenz) und der frequenzabhängigen Luftabsorption sowie Bodendämpfung dargestellt werden (siehe Abb. 1).

Da es keinen richtungsabhängigen Dämpfungseffekt gibt, sind die Linien gleicher Dämpfung Kreise. Für geringe Schallfrequenzen bis ca. 100 Hz ist der Einfluss der Luftabsorption sehr gering und wird erst für sehr große Ausbreitungsentfernungen (einige km) relevant. Der bestimmende Effekt ist hier die Abnahme des Schallintensitätspegels durch die divergente Ausbreitung einer als kugelförmig angenommenen Schallwelle. Das führt zu einer Dämpfungspegelzunahme von 6 dB bei Entfernungsverdopplung (siehe Abb. 1, links). Mit zunehmender Frequenz nehmen auch der Einfluss der Absorption in Luft und die Bodendämpfung zu. Die Schalldämpfung nimmt deshalb insbesondere in größeren Entfernungen von der Schallquelle deutlich zu (siehe Abb. 1, rechts).

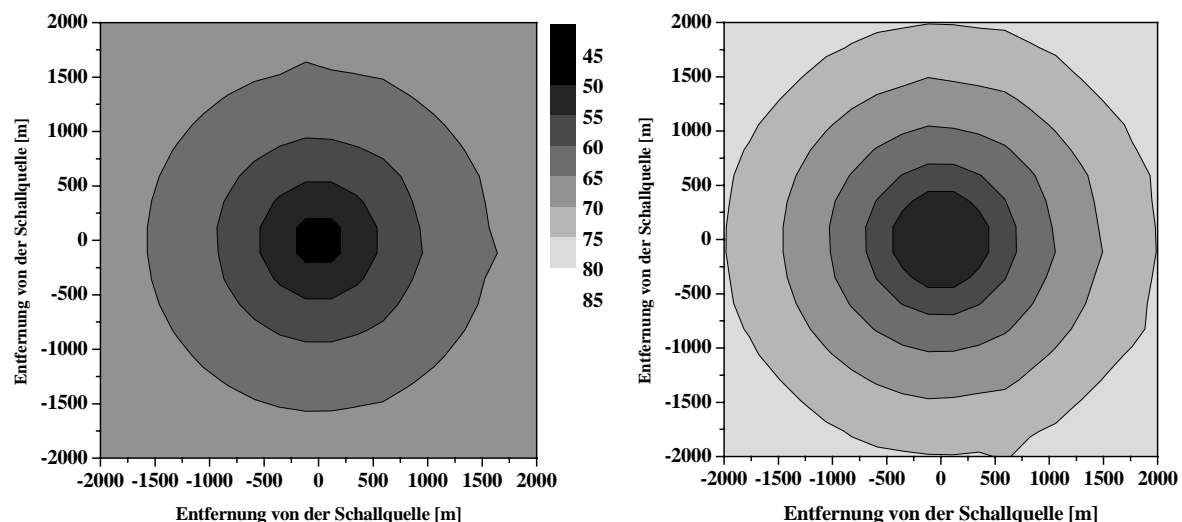


Abb. 1: Dämpfungspegel [dB] für die Schallimmission in einer Höhe von 5 m bei einer Frequenz von 125 Hz (links) bzw. 1000 Hz (rechts) durch den Einfluss der Kugelwellendivergenz und Luftabsorption und ohne Schallstrahlenrefraktion. Die Schallquelle befindet sich im Punkt (0,0) in 140 m Höhe.

Abweichungen der Isolinen von der Kreisform resultieren aus dem Interpolationsmodul des Grafikprogramms.

Mit den Eingangsdatensätzen der Atmosphärensichtungen wurde nun eine Datenbank mit simulierten Dämpfungspegeln erstellt, die zusätzlich zur Kugelwellendivergenz vom Atmosphäre-Boden-Einfluss abhängig sind. Mit Hilfe der Dämpfungspegel ohne Schallstrahlenrefraktion (siehe Abb. 1) wurden außerdem Zusatzdämpfungen bestimmt, die nur den Einfluss der gekoppelten Schallstrahlenrefraktion in der Atmosphäre mit der Schallstrahlenreflexion am Boden auf die Schallausbreitung beschreiben (siehe Kapitel 3). Bildpunkte, die eine Zusatzdämpfung über 100 Dezibel aufweisen, befinden sich im geometrischen Schallschatten. In der Realität wird dieser Schallschatten durch die Turbulenz in der Atmosphäre und die Wirkung von Schallwellen an Bodenoberflächen abgeschwächt.

Die Datenbank wurde nun bezüglich ihrer tageszeitlichen und jahreszeitlichen Variabilität untersucht (siehe Ziemann und Balogh, 2005b). Exemplarisch sind hier Ergebnisse dargestellt, die mit einer Schallfrequenz von 1000 Hz simuliert wurden (siehe Abb. 2). Hier kann das

menschliche Hörorgan den größten Schallintensitätsbereich wahrnehmen, physiologische Schallparameter werden deshalb ebenfalls auf diese Frequenz bezogen.

Betrachtet man zunächst beide Darstellungen der Abbildung 2 getrennt voneinander, lassen sich deutliche Unterschiede zwischen den Jahreszeiten erkennen. So treten tagsüber im Winter negative Zusatzdämpfungen, das heißt erhöhte Schallintensitätspegel im Vergleich zu einer ungestörten Schallausbreitung, am seltensten auf. Demgegenüber ergeben sich bei einer Schallausbreitung mit einer Schallquelle in Bodennähe im Winter die höchsten relativen Häufigkeiten einer negativen Zusatzdämpfung auf Grund einer Temperaturinversion am Boden (siehe Ziemann et al., 2004b). Bei einer in 140 Meter Höhe liegenden Schallquelle wurde im Untersuchungszeitraum jedoch die Inversionsobergrenze häufig überschritten. Dies führt in der Gegenwindrichtung zu einer Verstärkung der vom Erdboden aufwärts gerichteten Brechung der Schallstrahlen und in der Mitwindrichtung zu einer Abschwächung der Abwärtsrefraktion, bei überwiegendem Temperatureinfluss sogar zu einer Umkehr der Refraktionsrichtung. In der Winternacht entsprechen die Häufigkeitsverteilungen der Zusatzdämpfungen der Erwartung, d.h., es tritt eine große Anzahl negativer Zusatzdämpfungen durch hochreichende Temperaturinversionen auf.

Im Herbst und im Frühjahr treten in der Nacht ebenfalls negative Zusatzdämpfungen auf. Diese resultieren aus dem erwartungsgemäß häufigen Auftreten einer Temperaturinversion vom Boden bis in größere Höhen.

Ein direkter Vergleich zwischen den Häufigkeiten der Zusatzdämpfungen am Tag und in der Nacht ist hierbei nicht möglich, da bevorzugte Atmosphärensichtungen in die Berechnungen eingegangen sind (Ziemann und Balogh, 2005a).

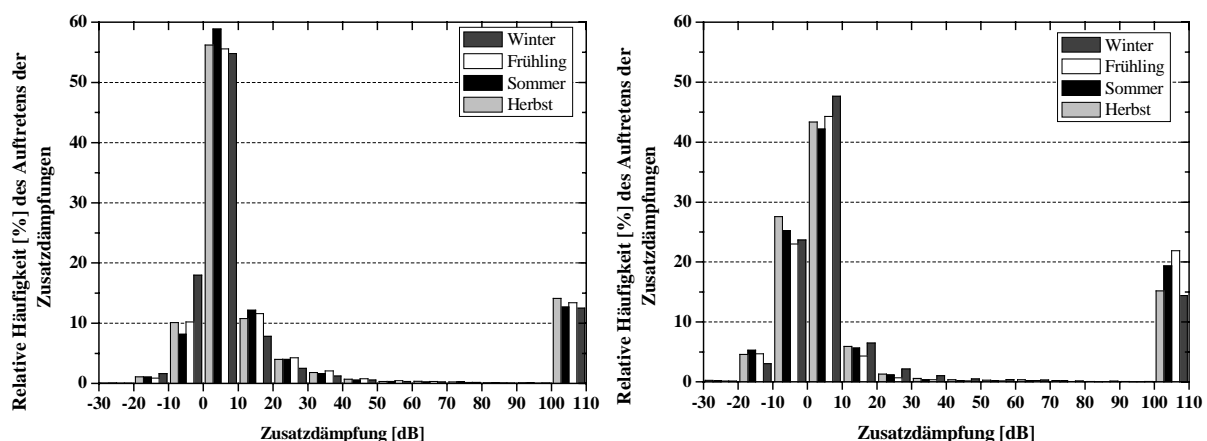


Abb. 2: Relative Häufigkeit des Auftretens der Zusatzdämpfungen (1000 Hz) bedingt durch den Atmosphäre-Boden-Einfluss in der Nacht (00:00 UTC) –links– und am Tag (12:00 UTC) –rechts– für Lindenberg 2003. Der Untersuchungszeitraum beträgt jeweils 3 Monate (Winter: Dez., Jan., Feb.; Frühling: Mär., Apr., Mai; Sommer: Jun., Jul., Aug.; Herbst: Sep., Okt., Nov.).

Die größte Abweichung vom erwarteten Verhalten im Vergleich mit einer bodennahen Schallquelle weist der Sommer während der Schallausbreitung am Tag auf (siehe Abb. 2 rechts). Hier treten überraschend hohe Häufigkeiten von negativen Zusatzdämpfungen auf. Die Ursache hierfür liegt in den speziellen Wetterverhältnissen im Sommer des Jahres 2003. Anfang Juli stellte sich eine Großwetterlage ein, die bis weit in den August hinein stabil blieb. Europa stand in diesem Zeitraum durchgängig unter dem Einfluss eines starken Hochdruckgebietes. In den Nächten kam es zur Ausbildung einer starken Temperaturinversion, die am Tag als freie Inversion in höheren Atmosphärenschichten vorzufinden war und sich am Abend wieder senkte. Dadurch wurden die Schallstrahlen verstärkt in Richtung Erdoberfläche gebrochen, wo es zu einer Fokussierung und verstärkten Schallimmission kam.

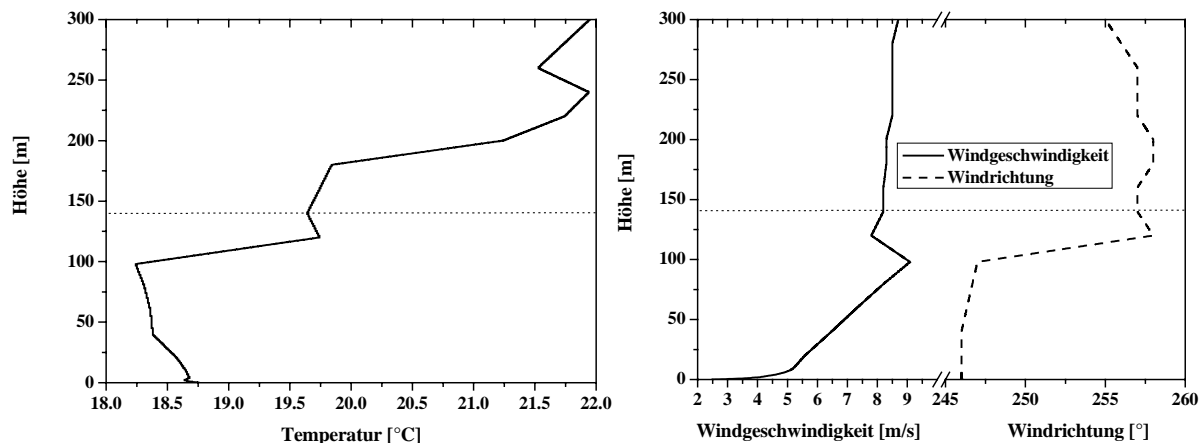


Abb. 3: Vertikales Temperaturprofil (links) und Windprofil (rechts) für den 01.07.2003 12:00 UTC in Lindenberg. Die gepunktete Linie markiert die Höhe der Schallquelle.

Liegt die Inversionsuntergrenze wie in Abbildung 3 (links) unterhalb der Schallquelle, wirkt das Temperaturprofil zunächst begünstigend auf die horizontale Schallausbreitung, dass heißt, in der Mitwindrichtung werden die Schallstrahlen stärker in Richtung des Erdbodens refraktiert und in der Gegenwindrichtung wird die Aufwärtsrefraktion abgeschwächt und bei geringem Windeinfluss sogar umgekehrt. Abbildung 3 (rechts) zeigt die vertikalen Profile der Windrichtung und Windgeschwindigkeit. Auch hier lässt sich die Höhe der Inversionssgrenze ablesen, denn die Windgeschwindigkeit bleibt ab diesem Niveau annähernd konstant. Im Windrichtungsprofil kann man einen für solch eine meteorologische Situation typischen Windsprung erkennen.

Oberhalb der Inversionsschicht wird die Refraktion nur noch durch das Temperaturfeld bestimmt. Es kommt auf Grund des positiven Temperaturgradienten in der Abstrahlhöhe der Schallquelle in allen Richtungen zur Abwärtsrefraktion der Schallstrahlen. Dies führt bei den nahezu horizontal abgestrahlten Schallstrahlen zu einer Totalreflexion in der Atmosphäre oberhalb des Immissionsniveaus. Die reflektierten Strahlen liefern keinen Beitrag zum Schallintensitätspegel im bodennahen Immissionsniveau. Dieses Verhalten bewirkt in der Mitwindrichtung eine leichte zusätzliche Schalldämpfung.

In der Abbildung 4 ist eine horizontale Zusatzdämpfungskarte für die in Abbildung 3 gezeigten Vertikalprofile der Lufttemperatur und des Windvektors dargestellt. Die Verteilung der Zusatzdämpfungen entspricht dabei nicht der üblichen Verteilung für eine Schallausbreitung mit einer in Bodennähe liegenden Schallquelle (Ziemann et al., 2004a). Für eine bodennahe Schallausbreitung ist es typisch, dass eine Temperaturinversion eine negative Zusatzdämpfung in der Mitwindrichtung und in der Querwindrichtung bewirkt und damit zu einer Verstärkung des Schallintensitätspegels im Vergleich zu einem ruhenden ungeschichteten Medium führt. Bei einer Schallausbreitung von einer hohen Schallquelle zeigt sich jedoch ein anderes Verhalten. Da die nahezu horizontal abgestrahlten Schallstrahlen einer Totalreflexion oberhalb des Immissionsniveaus in der Atmosphäre unterliegen, durchqueren hier, im Gegensatz zu einer ungestörten Schallausbreitung, nicht alle Schallstrahlen das Immissionsniveau. Dieser Effekt führt zu einer leicht positiven Zusatzdämpfung in der Mitwindrichtung (Lärmabschwächung). Das Auftreten der Lärmverstärkung durch die Refraktion der Schallstrahlen in der Gegenwindrichtung lässt sich durch die Drängung der nach unten abgestrahlten Schallstrahlen in Quellnähe im Immissionsniveau begründen. Diese Schallstrahlen werden einmal an der Erdoberfläche reflektiert und dann vom Erdboden weg gebrochen. Der Übergang zwischen dieser Region und dem Schallschatten, welcher sich in rund einem Kilometer Abstand von der Schallquelle befindet, ist abrupt und erstreckt sich nur über wenige hundert Meter.

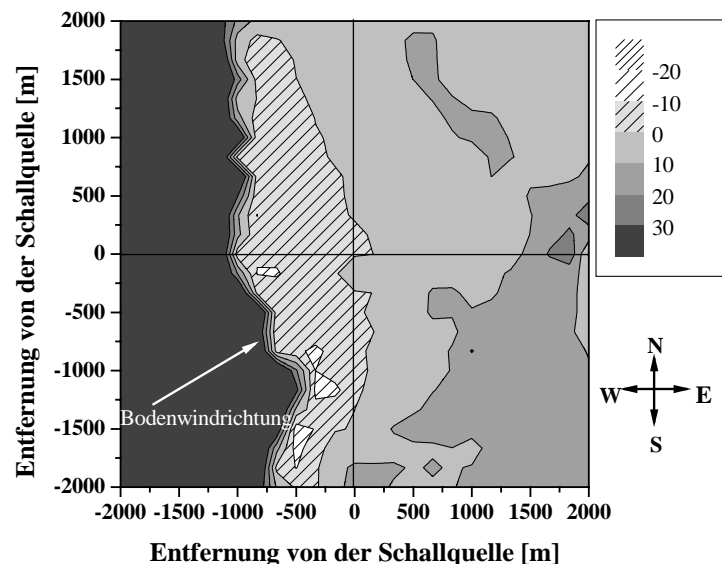


Abb. 4: Zusatzdämpfung [dB] (1000 Hz) für die Schallimmission in einer Höhe von 5 m bedingt durch den gekoppelten Einfluss von Atmosphäre und Boden. Die Schallquelle befindet sich im Punkt (0,0) in 140 m Höhe. Negative Zusatzdämpfungen stehen für eine Verstärkung des Schallintensitätspegels im Vergleich zu einer ungestörten Schallausbreitung und positive Zusatzdämpfungen für eine verminderte Schallimmission (Lindenberg 01.07.2003, 12:00 UTC).

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Ein Hauptergebnis der Untersuchungen ist eine Datenbank mit frequenzabhängigen Dämpfungspegeln bzw. Zusatzdämpfungen des Schallintensitätspegels durch den gekoppelten Atmosphäre-Boden-Einfluss für Immissionsorte bis 2000 m Entfernung von der Schallquelle für die meteorologischen Randbedingungen von einem repräsentativem Jahr am Standort Lindenberg.

Aus den bisherigen Auswertungen können zwei wichtige Schlussfolgerungen gezogen werden. Auf der einen Seite bestehen Unterschiede zwischen einer Schallausbreitung von einer bodennahen und einer höher gelegenen Schallquelle. Im Winter kommt es häufig vor, dass die hohe Schallquelle oberhalb der Inversionsgrenze liegt. Dadurch kommt es im Vergleich zu einer bodennahen Schallausbreitung zu einer erhöhten Häufigkeit positiver Zusatzdämpfungen. Um genauer festzustellen, wodurch diese Steigerung bestimmt wird, müssen weitere Häufigkeitsuntersuchungen zum Auftreten bestimmter Vertikalprofile (z.B. bodennahe Temperaturinversion, freie Inversion, Inversionsobergrenze) durchgeführt werden.

Andererseits wurde anhand der Statistiken (siehe Abb. 2) festgestellt, dass trotz einer Mittelwertbildung über drei Monate Abweichungen vom erwarteten Verhalten im Vergleich zur bodennahen Schallausbreitung auftreten. Bei der Bildung eines Monatsmittels sind diese Eigenheiten, besonders im Juli/August auf Grund der besonderen Wetterlage im Sommer 2003, noch größer. Um allgemeingültigere Aussagen treffen zu können, sind mehrere Jahre (mindestens 10) für die Station Lindenberg zu betrachten. Eine Mittelung der Dämpfungspegel über die Jahreszeiten würde dann eher einem repräsentativen, klimatologischen Mittelwert entsprechen.

Die Ergebnisse der Arbeit beziehen sich außerdem auf den Ort Lindenberg, der als repräsentativ für das deutsche Binnenland/Tiefland zu betrachten ist. Es ist darauf zu achten, dass diese Statistiken nicht für verschiedene Orte zu verallgemeinern sind, da regionale Unterschiede in den meteorologischen Eingangsdaten über das Jahr bestehen (z.B. Ziemann et al., 2004b). Mit einer regionalisierten Untersuchung sollten dementsprechend räumlich repräsentative Dämpfungsdatenbanken für verschiedene Standorte erstellt werden.

Danksagung

Hiermit danken wir für die finanzielle Unterstützung dieser Studie durch das Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (LUA Essen, Werkvertrag Werkvertrag-Nr. 81/05, Auftrag Nr. 52096). Dem Deutschen Wetterdienst (DWD Meteorologisches Observatorium Lindenberg) danken wir für die Datenbereitstellung im Rahmen dieser Studie.

Außerdem danken wir Herrn Michael Wilsdorf und Frau Ina Weithäuser für die Unterstützung während der Auswertung des umfangreichen Datenmaterials.

Herrn Michael Bender danken wir für die kritische Durchsicht des Manuskripts.

Literatur

- Balogh, K. und Ziemann, A., 2005: Einfluss von Atmosphäre und Boden auf die Schallausbreitung im Freien. Wiss. Mitt. Inst. für Meteorol. Univ. Leipzig, 36, 11-26.
- Bolen, L.N. und Bass, H.E., 1981: Effects of ground cover on the propagation of sound through the atmosphere, J. Acoust. Soc. Am. 69, 950-954.
- Brekhovskikh, L.M. und Godin, O.A., 1992: Acoustics of layered media II. Point sources and bounded beams. Springer Series on wave phenomena, Volume 13, Springer-Verlag, Berlin, 395 S..
- Delany, M.E. und Bazley, E.N., 1970: Acoustical properties of fibrous absorbent materials. Applied Acoustics 3, 105-116.
- DIN ISO 9316-1, 1996: Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien; Teil 1: Berechnung der Schallabsorption durch die Luft, Beuth-Verlag.
- DIN ISO 9613-2, 1999: Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien. Beuth-Verlag.
- Heimann und Salomons, 2004: Testing meteorological classifications for the prediction of long-term average sound levels. Applied Acoustics 65, 925-950.
- Kühner, D., 1993: Schallausbreitung im klimatologischen Mittel. Fortschritte der Akustik: Plenarvorträge und Fachbeiträge der 19. Deutschen Jahrestagung für Akustik/DAGA 93, 299-308.
- Orlanski, I. (1975), A rational subdivision of scales for atmospheric processes, Bulletin of the American Meteorological Society 56(5), 527-530.
- Ostashev, V.E., Hohenwarter, D., Attenborough, K., Blanc-Benon, Ph., Juvé, D. und Goedecke, G.H., 2001: On the refraction law for a sound ray in a moving medium Acustica 87, 303-306.
- Piercy, J.E., Embleton, T.F.W. und Sutherland, L.C., 1977: Review of noise propagation in the atmosphere. J. Acoust. Soc. Am. 61, 1403-1418.
- Raabe, A., Ziemann, A., Jagusch, F. und Arnold, K., 1998: Studie: Berücksichtigung atmosphärischer Schallausbreitungsbedingungen bei Messungen und Prognose von Schießlärm. Abschlußbericht zum Auftrag E/E91S/Y0922/X5114, 43 S..
- Salomons, E.M., 2001: Computational atmospheric acoustics, Kluwer Academic Publishers, 335 S..
- VDI-2714, 1988: Schallausbreitung im Freien. VDI-Verlag, Düsseldorf, 18 S..
- Ziemann, A., 2003: Auswirkungen unterschiedlicher Schallausbreitungsmodelle auf die Lärmprognose. Wiss. Mitt. Inst. für Meteorol. Univ. Leipzig, 30, 61-72.
- Ziemann, A. und Balogh, K., 2004: Schallimmissionsprognose über einer schallharten Oberfläche. Wiss. Mitt. Inst. für Meteorol. Univ. Leipzig, 34, 59-70.
- Ziemann, A., Arnold, K. und Raabe, A., 2004b: Berücksichtigung atmosphärischer Schallausbreitungsbedingungen bei Messungen und Prognose von Schießlärm. Abschlussbericht E/E91S/Y0922/X5144, 45 S..
- Ziemann, A. und Balogh, K., 2005a: Studie zum Einfluss hoher Schallquellen auf die Schallausbreitung. Zwischenbericht Werkvertrag-Nr. 81/05, Auftrag Nr. 52096, 2 S..
- Ziemann, A. und Balogh, K., 2005b: Studie zum Einfluss hoher Schallquellen auf die Schallausbreitung. Abschlussbericht zum Werkvertrag-Nr. 81/05, Auftrag Nr. 52096, 11 S..

Adresse:

Astrid Ziemann (ziemann@uni-leipzig.de), Kati Balogh (balogh@uni-leipzig.de)
 Universität Leipzig, Institut für Meteorologie
 Stephanstr. 3
 04103 Leipzig